

Prof. dr hab. Danuta Makowiec
Instytut Fizyki Teoretycznej i Astrofizyki
Uniwersytet Gdański

Gdańsk, 30 grudnia 2016

**Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Jana Gierałtowskiego pod tytułem:**

Wieloskalowa analiza właściwości fraktalnych rytmu serca człowieka

Tematyka pracy, cele i tezy pracy

Ruch Browna $B(t)$ — błądzenie przypadkowe o niezależnych i stacjonarnych przyrostach o rozkładzie Gaussa, charakteryzuje dobrze znany inwariant: proces $B(t)$ oraz proces przeskalowany $s^{1/2}B(t/s)$ dla dowolnej skali s mają identyczne rozkłady prawdopodobieństwa. Własność ta odnajduje się w ułamkowych ruchach Browna $B_H(t)$ z $0 < H < 1$ (ogólnieniu ruchu Browna) jako identyczność rozkładów procesów $B_H(t)$ oraz $s^H B(t/s)$. Przekłada się to także na szczególne własności funkcji autokorelacji przyrostów procesu $\delta B_H(t)$ — potęgowe malenie korelacji $C(\tau) = \langle \delta B_H(t)\delta B_H(t+\tau) \rangle \propto \tau^{-\gamma}$ z wykładnikiem $\gamma = 2 - 2H$ dla $H > 0.5$, co oznacza występowanie długozasięgowych korelacji. Dlatego też procesy te stały się naturalnymi kandydatami dla modelowania sygnałów rzeczywistych o tzw. długozasięgowych korelacjach, pojawiających się w teorii turbulencji, modelowaniu rynku akcji, danych medycznych czy geofizycznych. A ponieważ dodatkowo krzywa $B_H(t)$ ma geometryczny wymiar fraktalny $D = 2 - H$, to własności te nazywa się fraktalnymi.

Własności fraktalne serii opisujących odstępy czasowe pomiędzy kolejnymi skurczami serca, tak zwanych serii interwałów RR, dostrzeżone zostały już w roku 1982 w pracy Kobayashi i Musha (IEEE Trans. Biomed. Eng. 29, 456–457) jako fluktuacje $1/f$ rytmu serca. W latach 90-siątych po pracy Penga z współautorami (Phys. Rev. Lett. 70, 1343(1993)) nastąpił lawinowy rozwój badań nad długozasięgowymi korelacjami w rytmie serca.

Praca serca jest nadzorowana nieustannie przez autonomiczny układ nerwowy — z jego częścią sympatyczną przyspieszającą rytm skurczów serca i częścią wagalną, zwalniającą ten rytm. Zaburzenia tej wzajemnie przeciwstawnej regulacji mogą implikować niewłaściwą dystrybucję krwi w organizmie, co w konsekwencji może prowadzić do stanów chorobowych. Nie dysponujemy prostymi metodami umożliwiającymi nieinwazyjny pomiar aktywności układów sympatycznego, a w szczególności wagalnego. Dlatego też pośrednie metody, bazujące na przeświadczeniu iż zmiany w rytmie serca odpowiadają zmianom we wzajemnej aktywności obu układów, zyskały wielką uwagę. Przegląd metod zarówno

klasycznych, opartych na statystycznych własnościach serii RR, jak i tych nowych wynikających z technik wypracowanych w badaniach nad układami złożonymi, zbiera wspólne opracowanie grupy naukowców powstałe w 1996 roku zwane *Task Force* (Eur. Heart J. 17, 354–381).

Kolejny impet badaniom fraktalnym nadało multifraktalne uogólnienie własności skalujących serii. Bazą dla multifraktalnej charakterystyki sygnału jest tak zwana funkcja rozdziału $R(q, s)$ i jej własności skalujące odniesione do fluktuacji kumulowanych zgodnie z rozmiarem fluktuacji. Nowy parametr q rozdziela, a jednocześnie inaczej zbiera, zależności pomiędzy niewielkimi zmianami w sygnale, od zależności, którym podlegają duże zmiany. Funkcja rozdziału i jej własności wynikają bezpośrednio z rozważań równowagowej termodynamiki. W szczególności oznacza to, że formalizm ten stosuje się do układów stacjonarnych i znormalizowanych. Zaproponowano szereg metod umożliwiających analizę multifraktalną w seriach niestacjonarnych. Jedną z nich jest multifraktalna analiza odtrendowanych fluktuacji (MF-DFA), gdzie funkcja rozdziału $F(q, s)$ jest wariancją sygnału lokalnie wielomianowo odtrendowanego. Metoda ta jest stosowana w wielu analizach serii RR i rozwijana przez doktoranta Jana Gierałtowskiego.

Fundamentem analizy multifraktalnej są własności skalujące funkcji rozdziału. Dlatego też każdorazowo obecność skalowania musi być udowodniona. Często skalowanie w serii ogranicza się jedynie do pewnych skal i zmienia się wraz ze zmianą skali. Mówimy wówczas o sygnałach z punktem/punktami zwrotnymi (crossovers) czy też dalej fraktalami wieloskalowymi - główny temat rozprawy doktorskiej Jana Gierałtowskiego. W każdym przypadku skalowanie musi oznaczać występowanie zależności potęgowej funkcji rozdziału w kilku (co najmniej dwóch) skalach.

Wśród naukowców opis fraktalny budził i nadal budzi zastrzeżenia. Przede wszystkim brakuje wiarygodnych metod estymacji wykładników skalowania. Możliwości DFA wykrycia właściwych korelacji w krótkich seriach, czy też dla małych skal, są ograniczone. DFA systematycznie ponad estymuje szumy antypersystentne. Wiele prac proponuje zestawy przepisów, tzw. reguły kciuka, posługiwania się daną metodą by umożliwić usystematyzowanie błędów. Przykładowo *Introduction to multifractal detrended fluctuation analysis in Matlab* opracowanie Espena Ihlena (Frontiers in Physiology 3, 144 (2012), poz. [56] rozprawy) jest tego typu propozycją. Taką próbą jest także używanie dwóch indeksów skalowania DFA w charakterystyce rytmu serca: wykładnika α_1 opisującego skalowanie w obrębie 4-11 uderzeń serca oraz α_2 opisującego korelacje w zakresie od 16 do 64 uderzeń serca (wg autorów popularnego pakietu do badania zmienności rytmu serca *Kubios*) czy od 50 do 200 jak to jest przyjęte w znanej analizie fraktalności serii nocnych (Schumann et al. SLEEP 33(7),943-955 (2010)).

Ponadto nadal nie mamy bezpośredniej interpretacji fizjologicznej uzyskiwanych wyników. W przypadku rytmu serca uważa się, że skale, przy których skalowanie jest obecne w seriach RR, można łączyć z różnymi wpływami układu autonomicznego. Niemniej trzeba pamiętać, że na rytm serca — jego zmiany, mają też wpływ inne czynniki (dystrybucja hormonów, swoista zmienność węzła zatokowo-przedsionkowego — naturalnego

